

Фотодиод на основе GaP для среднего ИК-диапазона

А. К. Будтолаев, П. Е. Хакуашев, И. В. Чинарёва

Рассмотрена возможность создания диода с барьером Шоттки на GaP с низкой высотой барьера для реализации возможности работы в качестве обнаружителя мощных оптических сигналов в среднем ИК-диапазоне. Были проведены исследования влияния увеличения концентрации носителей заряда в области контакта на высоту барьера. В структуру GaP n- и p-типа проводимости были имплантированы различные ионы при разных дозах и энергиях с последующим отжигом в течении 60 минут при температуре 700 °С в азотной среде. Были исследованы CV-характеристики образцов, по результатам которых были определены высоты барьеров. Полученные результаты подтвердили теоретические расчёты. В работе показано, что необходимое снижение высоты барьера «металл–полупроводник» для сдвига спектральной чувствительности GaP в инфракрасную область, может быть получено путем легирования контактной области эпитаксиального слоя n-типа проводимости ионами Si с энергией 100 кэВ и дозой (флюенсом) $4 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ с последующим отжигом имплантированного слоя в течении 60 минут в атмосфере N₂ при температуре 700 °С. В качестве барьерного металла может быть использована золотая плёнка, напылённая в вакууме. Результаты исследования показали, что увеличения концентрации носителей заряда в области контакта до значений около 10^{19} см^{-3} даёт возможность снижения высоты барьера Au-n-GaP до 0,2 эВ.

Ключевые слова: GaP, барьер Шоттки, фотоприемник, имплантация, концентрация носителей, CV характеристики.

Введение

Интерес к двухспектральным фотоприемникам, работающим как в ультрафиолетовом (УФ), так и в инфракрасном (ИК) диапазонах, определяется их способностью дополнять друг друга при сильном солнечном фоне и др.

Двухспектральные гибридные фотоприёмники (ФП) серийно выпускаются рядом фирм, например, Hamamatsu, Thorlabs. Эти устройства представляют собой гибридные сэндвич-приёмники, в которых на базовый кремниевый кристалл монтируется кристалл на основе InAsSb [1] или InGaAs [2]. Кремниевый фотодиод используется для регистрации излучения длин волн $0,32 \div 1,1 \text{ мкм}$, фотодиод на основе InGaAs для длин волн $0,9 \div 1,7 \text{ мкм}$, а фотодиод на основе InAsSb для длин

волн $5,3 \text{ мкм}$. Однако УФ-фотоприёмники на основе GaP, чувствительные в диапазоне $0,2 \div 0,5 \text{ мкм}$, имеют ряд преимуществ по сравнению с кремниевыми, а именно: они практически не чувствительны к видимой части спектра, работают при более высокой температуре, обладают большей радиационной стойкостью, имеют широкий динамический диапазон [3]. При этом представляется очень перспективным направлением разработка двухканального фотоприёмного устройства с фоточувствительными элементами, работающими в УФ- и ИК-диапазонах, но реализованным интегрально на одной подложке [4].

В работе [5] показана возможность работы фотодиода с барьером Шоттки на GaP в двух спектральных диапазонах. В первом, основном ($0,28 \div 0,54 \text{ мкм}$), чувствительность обеспечивается за счёт собственного поглощения, т. е. ФП работает как пороговый в ультрафиолетовом диапазоне. Во втором, вспомогательном диапазоне ($0,54 \div 0,98 \text{ мкм}$), чувствительность может обеспечиваться за счёт поглощения на свободных носителях заряда и разделении «горячих» носителей на дополнительном барьере Шоттки (с более низкой высотой барьера), другими словами, ФП может работать как обнаружитель мощных оптических сигналов в инфракрасном диапазоне. Более того, если уменьшить высоту барьера до $0,25 \text{ В}$, то

Будтолаев Андрей Константинович, ведущий инженер-технолог.

Хакуашев Павел Евгеньевич, зам. начальник ПТК по производству, к.т.н.

Чинарёва Инна Викторовна, ведущий инженер-технолог. АО «НПО «Орион».

Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.
Тел. 8(495) 672-20-31. E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 29 мая 2017 г.

© Будтолаев А. К., Хакуашев П. Е., Чинарёва И. В., 2017

Эксперимент

В качестве образцов использовались эпитаксиальные структуры GaP $n-n^+$ с концентрацией в эпитаксиальном слое $5,5 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и GaP $p-p^+$ с концентрацией в эпитаксиальном слое $4 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Имплантацией в эпитаксиальную сторону ионов Si, S, As, В с дозами и энергиями, представленными в табл. 3, увеличивали концентрацию носителей в области контакта. Отжиг имплантированных слоёв проводился в среде азота при температуре

700 °С в течении 60 мин. Для образования контакта использовались металлы Ti, Al, Au, напыленные в вакууме. Контакт формировался фотолитографическим методом. На полученных образцах измерялись вольт-фарадные характеристики (CV -характеристики), по результатам которых строились графики зависимость $1/C^2$ от U . В табл. 3 представлены также параметры структур и вариации режимов имплантации и металлизации.

Таблица 3

Условия эксперимента

№ образца, тип проводимости	Имплантируемые ионы	Q , доза имплантации	E , энергия имплантации	Барьерный металл
1, n -тип	Si	$4 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$	100 кэВ	Ti
2, n -тип	Si	$4 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$	100 кэВ	Al
3, n -тип	Si	$4 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$	100 кэВ	Au
4, n -тип	S	$4 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$	150 кэВ	Ti
5, n -тип	S	$4 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$	150 кэВ	Al
6, n -тип	S	$4 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$	150 кэВ	Au
7, n -тип	As	$4 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$	150 кэВ	Ti
8, n -тип	As	$4 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$	150 кэВ	Al
9, n -тип	As	$4 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$	150 кэВ	Au
10, p -тип	Si	$2 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$	100 кэВ	Ti
11, p -тип	Si	$2 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$	100 кэВ	Al
12, p -тип	Si	$2 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$	100 кэВ	Au
13, p -тип	B	$2 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$	100 кэВ	Ti
14, p -тип	B	$2 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$	100 кэВ	Al
15, p -тип	B	$2 \times 10^{13} \text{ см}^{-2}$	100 кэВ	Au

Результаты и обсуждения

Для демонстрации экспериментальных результатов на рис. 1 представлен график зависимости $1/C^2$ от U для контакта Au и исходной GaP $n-n^+$ -структуры с концентрацией в области

контакта, равной $5,5 \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Там же показана экстраполирующая кривая, которую можно выразить формулой:

$$1/C^2 = 7 \times 10^{-5} U + 9 \times 10^{-5}$$

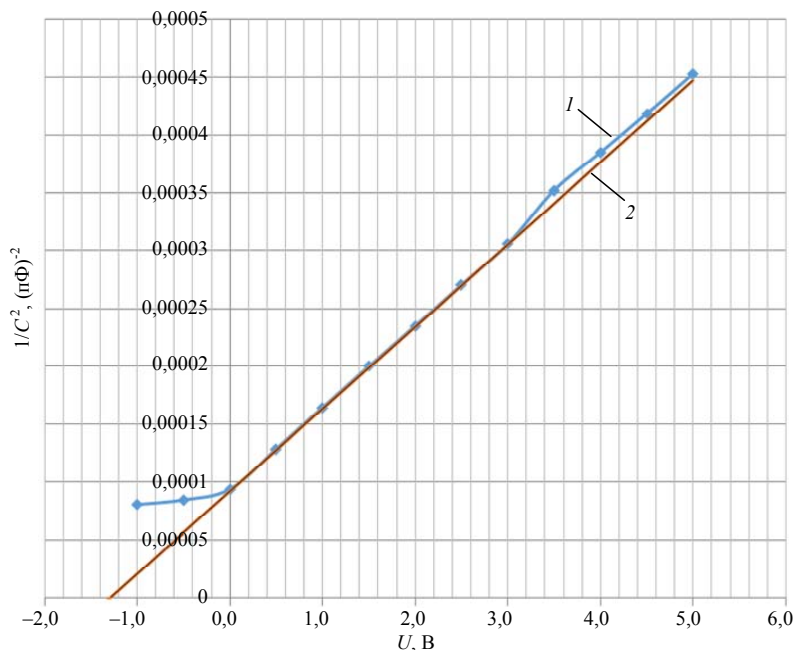


Рис. 1. График зависимости $1/C^2$ от напряжения U для исходной структуры Au-GaP (кривая 1). Кривая 2 – экстраполяция.

Далее найдя точку пересечения экстраполирующей прямой с осью напряжений, можно определить высоту барьера на исходной структуре, а именно, $\phi = 9 \times 10^{-5} / (7 \times 10^{-5})$ В = 1,29 В, которая практически совпадает с результатами, приведёнными в табл. 1.

В качестве противоположного примера на рис. 2 представлен график экспериментальной зависимости $1/C^2$ от напряжения U для контакта Au–GaP (образец № 3). Там же приведена экстраполирующая прямая:

$$1/C^2 = 5 \times 10^{-5} U + 1 \times 10^{-5}.$$

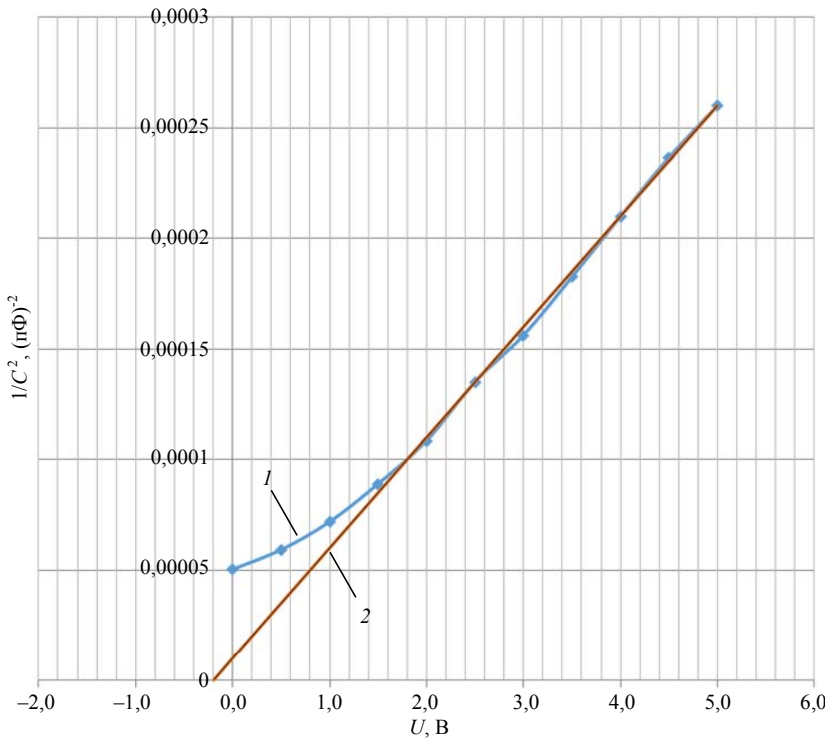


Рис. 2. График зависимости $1/C^2$ от напряжения U для структуры GaP, образец № 3 (кривая 1). Кривая 2 – экстраполяция.

Найдя точку пересечения экстраполирующей прямой с осью напряжений, можно определить высоту барьера, а именно, $\phi = 1 \times 10^{-5} / (5 \times 10^{-5})$ В = 0,2 В. Видно, что высота барьера понизилась на 1,1 В. Это соответствует теоретическим расчётам для GaP n -типа, легированного ионами Si с энергией 100 кэВ и дозой (флюенсом) 4×10^{14} см^{-2} (см. табл. 1).

Выводы

В работе продемонстрировано, что необходимое снижение высоты барьера «металл–полупроводник» для сдвига спектральной чувствительности GaP в инфракрасную область может быть получено путем подлегирования контактной области эпитаксиального слоя n -типа проводимости ионами Si с энергией 100 кэВ и дозой (флюенсом) 4×10^{14} см^{-2} с последующим отжигом имплантированного слоя в течении 60 минут в атмосфере N_2 при температуре 700 °С. В качестве барьерного металла может быть использована золотая плёнка, напылённая в вакууме. Результаты исследования показали, что увеличение концен-

трации носителей заряда в области контакта до значений 10^{19} см^{-3} даёт возможность снижения высоты барьера Au- n -GaP до 0,2 эВ.

Это открывает возможность создания двухканального фотоприёмного устройства на базе GaP с фоточувствительными элементами, работающими в УФ- и ИК-диапазонах, но реализованным интегрально на одной подложке.

ЛИТЕРАТУРА

1. <http://www.hamamatsu.com>
2. <http://www.thorlabs.com>
3. Филачёв А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Современное состояние и магистральные направления развития твердотельной фотоэлектроники. – М.: Физматкнига, 2010.
4. Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Пономаренко В. П., Филачёв А. М., Сало В. В. // Успехи прикладной физики. 2014. Т. 2. № 6. С. 623.
5. Варганова В. С., Кравченко Н. В., Патрин В. М., Трищенко М. А., Хакушев П. Е., Чинарёва И. В. / Труды XXIII Международной научно-технической конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения. 2014. С. 490–492.
6. Зи С. Физика полупроводниковых приборов. – М.: Мир, 1984.
7. Анисимова И. Д., Викулин И. В., Заитов Ф. А., Курмашев Ш. Д. Полупроводниковые фотоприёмники. Уль-

трафиолетовый, видимый и инфракрасный диапазоны спектра. – М.: Радио и связь, 1984.

8. Курносов А. И., Юдин В. В. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных микросхем. – М.: Высшая школа, 1979.

9. Руссел Х., Руге И. Ионная имплантация. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 1983.

10. Корицкий Ю. В., Пасынков В. В., Тареев Б. М. (ред.). Справочник по электротехническим материалам. Том 3. – Л.: Энергоатомиздат, 1988.

PACS: 85.60.-q

The GaP photodiode for the middle IR range

A. K. Budtolaev, P. E. Khakuashev, and I. V. Chinareva

Orion R&P Association
9 Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru

Received May 29, 2017

Consideration is given to the possibility of creation of a diode with the Schottky barrier on the GaP with a low barrier height. It is necessary for realizing a two-channel photodetector of UV and middle IR radiation. The effect of an increase in the concentration of charge carriers in the contact region on height of the barrier was investigated. Different types of ions were implanted into the GaP n- and p-type conductivity structures at different doses and energies, followed by annealing for 60 minutes at a temperature of 700 °C in a nitrogen atmosphere. The CV characteristics of the samples were investigated, the results of which determined the height of the barriers. The results obtained confirmed theoretical calculations. It is shown that the necessary reduction in the decrease in the height of the metal – semiconductor barrier for shifting the spectral sensitivity GaP into the infrared region can be obtained by subordinating the contact region of the n – type epitaxial layer with ions Si of energy 100 keV and a dose of $4 \times 10^{14} \text{ sm}^{-2}$ with the subsequent annealing of the implanted layer in for 60 minutes under nitrogen at 700 °C. A gold foil sputtered in a vacuum can be used as a barrier metal. The results of the investigation showed that an increase in the concentration of charge carriers in the contact region to values of about 10^{19} sm^{-3} makes it possible to reduce the barrier height Au-n-GaP to 0.2 eV.

Keywords: GaP, Schottky barrier, photodetector, implantation, carrier concentration, CV characteristics.

REFERENCES

1. <http://www.hamamatsu.com>
2. <http://www.thorlabs.com>
3. A. M. Filachev, I. I. Taubkin, and M. A. Trishenkov, *The Current Status and Main-Line Trackage for Development of Photoelectronics* (Fizmatkniga, Moscow, 2010) [in Russian].
4. K. O. Boltar, I. D. Burlakov, V. P. Ponomarenko, A. M. Filachev, and V. V. Salo, *Usp. Prikl. Fiz.* **2**, 623 (2014).
5. V. S. Varganova, N. V. Kravchenko, V. M. Patrin, M. A. Trishenkov, P. E. Khakuashev, and I. V. Chinareva, in *Proc. XXIII Intern. Conf. on Photoelectronics* (NPO Orion, Moscow, 2014). P. 490–492.
6. S. M. Sze, *Physics of Semiconductor Devices* (Mir, Moscow, 1984) [in Russian].
7. I. D. Anisimova, I. V. Vikulin, F. A. Zaitov, and Sh. D. Kurmasev, *Semiconductor Photodetectors* (Radio I Svyaz, Moscow, 1984) [in Russian].
8. A. I. Kurnosov and V. V. Yudin, *Technology of Production of Semiconductor Devices* (Vyssh. Shkola, Moscow, 1979) [in Russian].
9. X. Rissel and I. Ruge, *Ion Implantation* (Fizmatlit, Moscow, 1983) [in Russian].
10. Yu. V. Koritskii, V. V. Pasyнков, and B. M. Tareev (Eds.), *Handbook on Electrotechnical Materials. Vol. 3.* (Leningrad, Energoatomizdat, 1988) [in Russian].